

海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析

III. 波の周期特性について

藤 本 昌 宣・渡 辺 潔

(干拓水工学研究室)

昭和60年10月17日 受理

Analysis of Ocean Waves in the shallow Area of the Ariake Sea by Oceanographic Observation System

III. On the characteristics of the wave period

Masanobu FUJIMOTO and Kiyoshi WATANABE

(Laboratory of Shore Reclamation and Hydraulic Engineering)

Received October 17, 1985

Summary

The wave periods were analyzed statistically from the data of ocean waves which were obtained by the observational apparatus of oceanic phenomena in the Ariake Sea, and the characteristics of the distribution and variation of wave periods in the shallow area were examined.

The following results were obtained.

- 1) The waves whose periods were 1~3 seconds, were remarkably excellent.
- 2) The representative wave periods increased almost lineally with significant wave heights.
- 3) The mean values of the mutual ratios of representative wave periods were as follows
$$\begin{aligned}T_{1/3}/\bar{T} &= 1.242, & T_{1/10}/\bar{T} &= 1.272, \\T_{\max}/\bar{T} &= 1.262, & T_{1/10}/T_{1/3} &= 1.022, \\T_{\max}/T_{1/3} &= 1.013, & T_{\max}/T_{1/10} &= 0.991.\end{aligned}$$
- 4) The relationships between the wave periods T_p corresponding to the peak of power spectrum density curve and representative wave periods were expressed as

$$\begin{aligned}T_{1/3} &= 0.879 T_p, & T_{1/10} &= 0.871 T_p, \\ \bar{T} &= 0.791 T_p, & T_{\max} &= 0.883 T_p.\end{aligned}$$

- 5) The relationship of the two average wave periods T_z , \bar{T} , derived from the moments of power spectrum density and calculated from the surface wave profiles, respectively, was as follows

$$T_z = 0.978 \bar{T}.$$

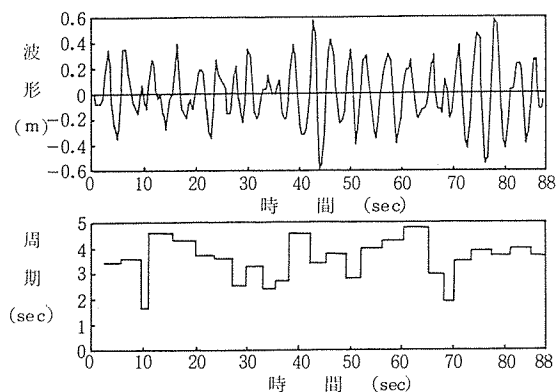
1. 緒 言

海面に発生する波の表面波形は時空間的に非常に不規則な変動を示す。このために、一連の波形からゼロアップクロス法によって定義される波群の波高と周期の変化も複雑で、比較的広い幅にわたって分布する。

本文は、有明海湾奥部の浅海域に設置した有明海海象観測塔（以降「観測塔」と略称）に取

付けた抵抗線型の波浪計によって測定した表面波形の変動を解析し、その周期特性について検討したものである。

2. 周期の経時変化



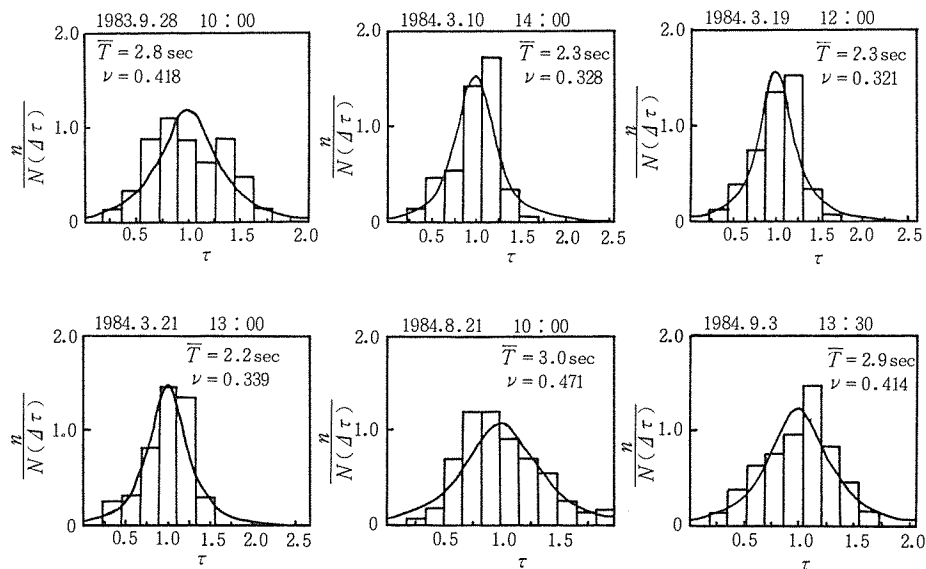
図一 波形および周期の経時変化
(1981年6月25日16時)

既報¹⁾で述べたように、抵抗線型の波浪計によってサンプリング間隔0.44秒で得られた1観測2500個の海面の水位変動に関する時系列データを、潮位変動の影響を除去するために200個ごとに平均し、この平均値からの偏差を波形データとした。図一は、このような波形変動を200個、すなわち88秒間について示したものである。不規則に変動する波形から周期を求めるためには、一般にゼロアップクロス法がよく用いられる。すなわち、波形が平均値ゼロを上向きに横切ってから、次に再び横切るまでの時間を周期とするものである。図一にはこのようにして求めた周期を波形に対比してあ

わせて示しているが、その経時変化はそれぞれの周期を幅にもつ階段状となる。

3. 周期の度数分布

浅海域に発生する波の周期の値とその出現頻度について検討するために、2. で述べた方法によって、1観測で得られる波のうち最初から255波に対するそれぞれの周期と、これらの平均



図二 周期比 $\tau = T/\bar{T}$ の相対度数分布

周期 \bar{T} から周期比 $\tau = T/\bar{T}$ を求めて、その分布の面積が 1 となるような相対度数分布図を作成した。図-2 は、これらの分布図のうち 1983 年から 1984 年にかけての 6 例について示したものである。観測塔においては、周期 2～3 秒の波が非常に卓越しており、また、周期比分布ではいずれも $\tau = 1.0$ すなわち $T = \bar{T}$ 付近でピークを持ち、全対的には \bar{T} が小さいほど分布の幅が小さく、ピークの大きい形を示す傾向にある。

このような周期比の分布の理論的な確率密度関数 $p(\tau)$ は、スペクトルの帯域幅の広がりを表わす指標 ν が、 $\nu \ll 1$ であることを前提として、次式のように導かれている²⁾。

$$p(\tau) = \frac{\nu^2}{2[\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}} \quad : \tau = T/\bar{T}$$

$$\text{ここで、} \nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2}$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df$$

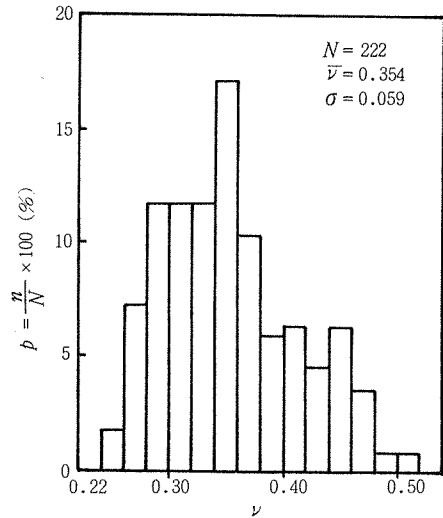


図-3 ν の度数分布

海の波の場合、この ν の値は一般に 0.3～0.8 程度であるとされている²⁾。観測塔において得られた 222 例の波形記録から周波数スペクトルを求め、 ν の値を計算すると、その度数分布は図-3 のようになる。これによれば、 ν の平均値は 0.354、最大、最小値はそれぞれ 0.514、0.244 となり、全体の約 60% が 0.3～0.4 の間に入る。そこで上に示した周期比の理論曲線式の適合性について検証を行うために、図-2 に示した 6 観測のそれぞれの日時における ν の値を代入して求めた理論曲線を同じ図にあわせて示す。この結果、それぞれの ν を適用することによって理論曲線を実測の度数分布にかなり近似させることができる。なお、 ν が小さくなるほど周波数の帯域幅が狭くなるために、平均周期すなわち $\tau = 1.0$ 付近での相対度数のピーク値は大きくなる。

4. 代表波周期の変動特性

1 時間ごとの一連の波形観測から得られる周期を統計的に処理して求めた代表波周期のうち、平均波、有義波および最大波のそれぞれの周期の経時変化を、1985 年 5 月 11 日～14 日と 6 月 21 日～24 日の例で図-4 に示す。また、この図には風向、風速、潮位（水深）および代表波波高の変動もあわせて示している。

代表波周期は、一連の波高・周期の測定値から代表波波高を求める際に、波高の大きさの順に従属して周期をならべかえることによって決定されるものである。したがって、代表波波高がその定義から、最大波、1/10 最大波、有義波および平均波の順に小さい値をとるのに対して、代表波周期の大きさは必ずしもこの順序とはならない。このために、代表波波高の経時変化においては、水深や風速の影響が顕著に現われるが³⁾、周期の変動は非常に複雑である。しかし、総体的にはほぼ 1.0～3.0 秒の間で変動し、波高の大きいところで周期がいく分大きくなるような傾向がみられる。

そこで、代表波周期 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ 、 \bar{T} および T_{max} の値が有義波高 $H_{1/3}$ の大きさによってどのよ

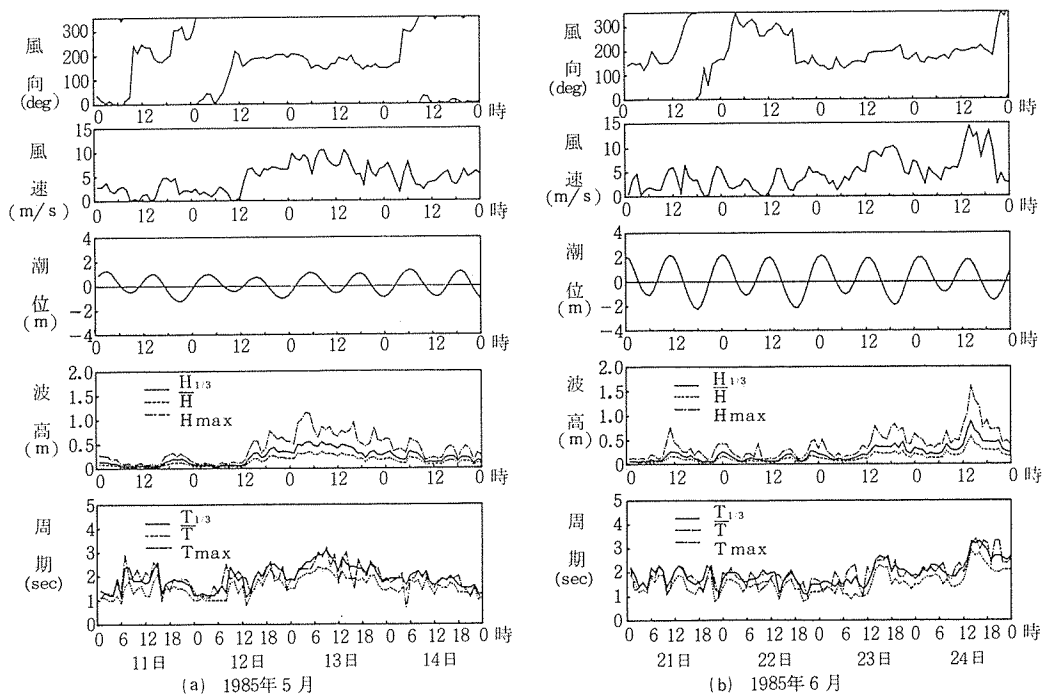
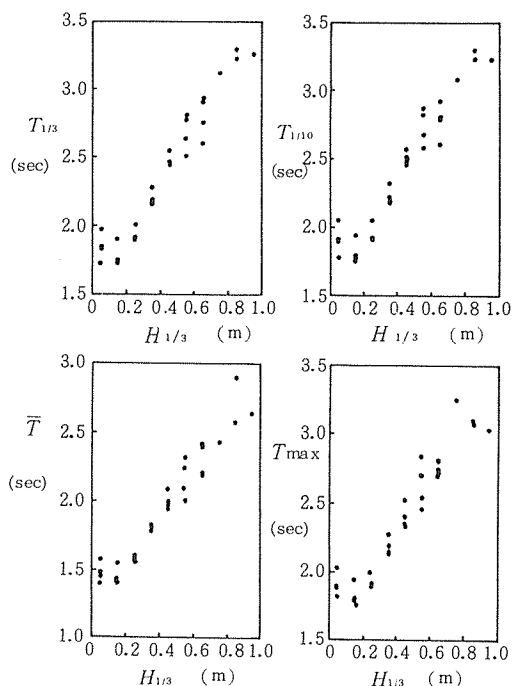


図-4 周期、波高、潮位、風向および風速の経時変化

図-5 有義波高と代表波周期の関係
(1985年4月～7月)

うに変化するかを明らかにするために、 $H_{1/3}$ を0～10cm, 10～20cm, ……のように10cmごとに分けし、それぞれの区間における周期の平均値を計算の便宜上1か月ごとに求めた。計算結果の一例として1985年4月～7月の場合を図-5に示す。 $H_{1/3}$ が0～20cm区間に全データの60%近くが集中しているために、60cm以上のデータ数が極端に少なくなって、その精度は低くなるが、 $H_{1/3}$ が1mまでの範囲では、波高が大きくなるにつれて各周期ともほぼ直線的に増加する傾向がみられる。

5. 代表波周期の度数分布

各代表波周期ごとに1年間における出現周期の度数分布を1978年と1982年について求めたものを図-6に示す。この結果、各代表波周期ともにその平均値は2秒前後であり、1.5～2.5秒の間に全体のほぼ75%が集中している。また、代表波波高の年間度数分布が経年的に一定である³⁾のと同様に、代表波周期

の度数分布においても年による差はなく、ほとんど同じパターンを示している。

さらに、このような出現率の度数分布を1985年6月の例で図一7に示す。この図にはそれぞれの分布の平均値と標準偏差から求めた正規分布曲線もあわせて示している。これによれば、各代表波周期の分布曲線はいずれも正規分布曲線に近似した形となる。このような相対度数分布におけるひずみ度 C_s および尖鋭度 C_k は、それぞれ次式で表わされる⁴⁾。

$$C_s = \frac{1}{\sigma^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3$$

$$C_k = \frac{1}{\sigma^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^4$$

ここで、 σ ：標準偏差、 N ：データ数、 T_i 、 \bar{T} ：周期とその平均値

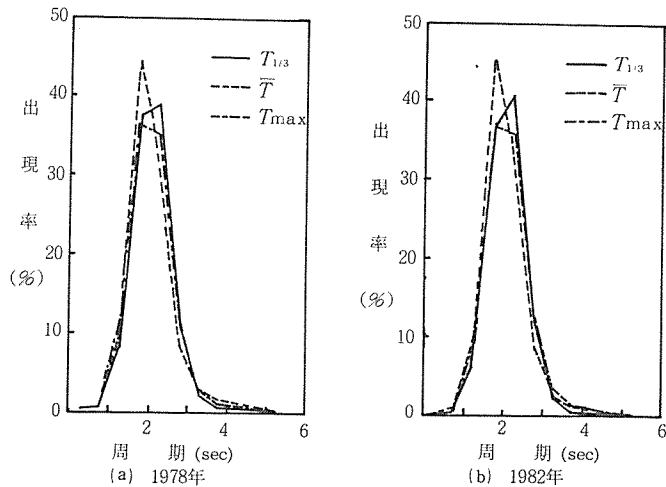
正規分布では、 $C_s=0.0$ 、 $C_k=3.0$ となるが、代表波周期の分布では図一7の例を含めて、一般に $C_s > 0$ 、 $C_k > 3.0$ となり、正規分布よりやや中央部がとがった、左側に傾いた曲線となる。

6. 代表波周期の周期比

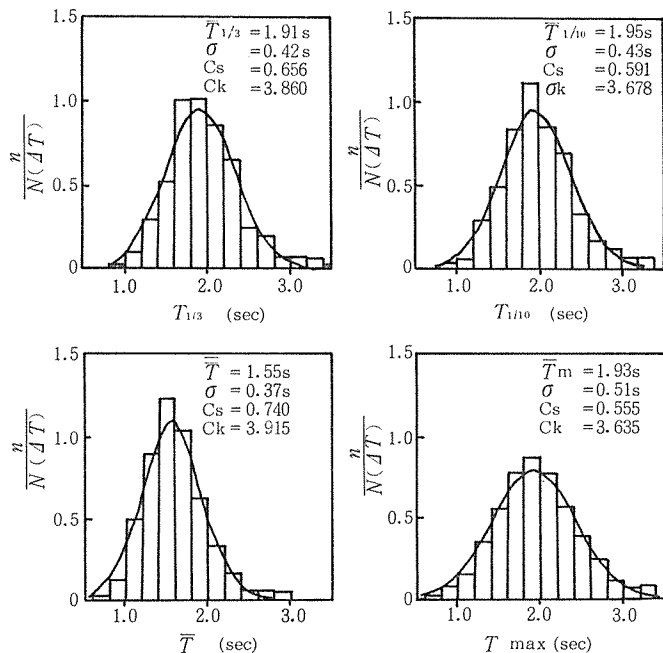
4. で述べたように、代表波周期是一群の波高・周期観測から代表波波高を求める際に従属して決定されるものである。こ

のため、周期比については、周期の度数分布から理論的に求めることは不可能である。

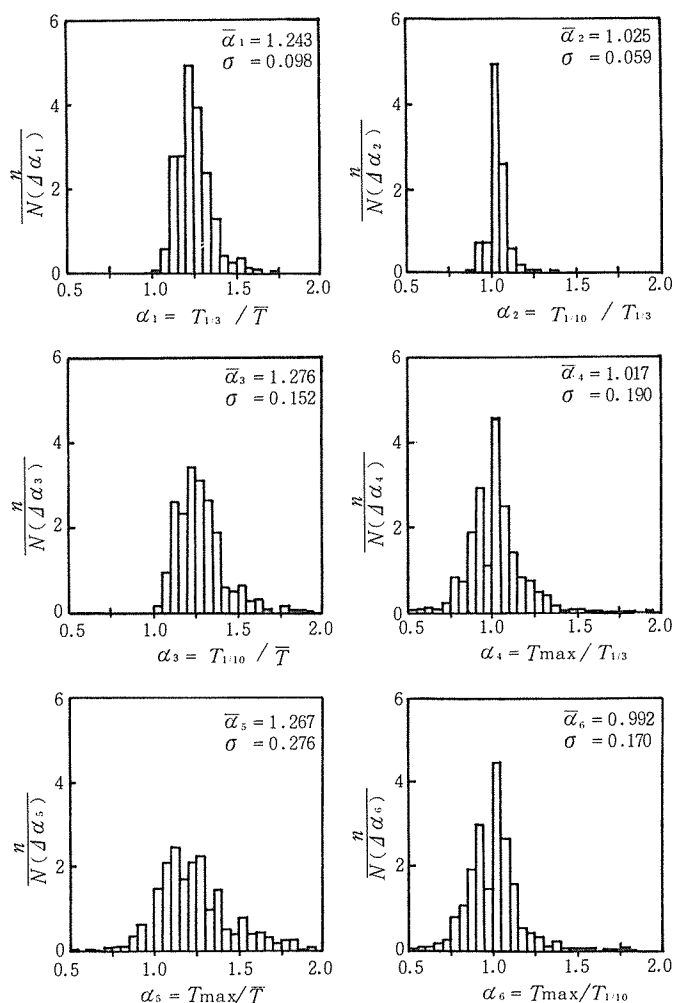
したがって、ここでは1985年4月～7月の4か月間の観測値を処理することによって、代表波相互の周期比を検討した。図一8は一例として5月における6種類の周期比の相対度数分布を示したものである。従来からいわれているように、一連の波形観測から統計的に得られる $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ および T_{max} の値はほとんどひとしく、 \bar{T} がこれよりやや小さい値を示すことから、周期比については、 $T_{1/10}/T_{1/3}$ 、 $T_{max}/T_{1/3}$ 、 $T_{max}/T_{1/10}$ がほぼ1.0に近く、 $T_{1/3}/\bar{T}$ 、 $T_{1/10}/\bar{T}$ 、 T_{max}/\bar{T} がこれよりやや大きい値を示している。これらの比の値は、データのサンプリング期間に



図一6 代表波周期の年間出現率



図一7 代表波周期の相対度数分布
(1985年6月)

図-8 代表波周期相互の周期比 (1985年5月: $N=744$)

よって多少の変動を示すが、前述の4か月間における周期比の平均値およびその変動幅はそれぞれ次のようであった。

周期比	観測塔	合田ら ⁵⁾
$T_{1/3}/\bar{T}$	1.242 (1.231~1.258)	1.14 (0.9~1.4)
$T_{1/10}/\bar{T}$	1.272 (1.257~1.289)	
T_{max}/\bar{T}	1.262 (1.257~1.267)	
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.022 (1.019~1.025)	1.01 (0.9~1.1)
$T_{max}/T_{1/3}$	1.013 (1.004~1.018)	0.99 (0.6~1.3)
$T_{max}/T_{1/10}$	0.991 (0.980~0.999)	

合田ら⁵⁾は、名古屋港(深海)と沿岸域(浅海)の波浪から求めた $T_{max}/T_{1/3}$, $T_{1/10}/T_{1/3}$ および $T_{1/3}/\bar{T}$ を比較した結果、これらの海域において前2つの周期比はほとんど同じ値を示すが、 $T_{1/3}/\bar{T}$ はそれぞれ1.07, 1.23で、沿岸域の方が大きい値となり、さらにこのことは浅海へ波が

伝播するにつれて、相対的に $T_{1/3}$ が増大、あるいは \bar{T} が減少することを示唆するとしている。観測塔においても、 \bar{T} を含む周期比は1.24前後となり、浅海域の特徴を示しているものと考えられる。

7. 代表波周期と波形スペクトルの関係

波形の時系列データから求めた周波数スペクトル曲線において、エネルギーがピークを示すときの周波数 f_p に対応する周期 T_p と有義波周期 $T_{1/3}$ の関係については、次のような報告がある。

光易 ⁶⁾	——博多湾	$T_{1/3} = \frac{1}{1.05} T_p = 0.95 T_p$
合田・永井 ⁵⁾	——沿岸域	$T_{1/3} = 0.91 T_p$
	——名古屋港	$T_{1/3} = 0.96 T_p$
	——線型シミュレーション	$T_{1/3} = 0.87 T_p$

このような関係を観測塔において得られた代表波周期 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ 、 \bar{T} 、 T_{max} と T_p に適用し、その関係を222例について図-9に示す。この図は $T_{1/3}$ および \bar{T} と T_p の関係についてのみ示し、 $T_{1/10}$ と T_{max} については省略しているが、 $1/f_p$ すなわち T_p と代表波周期は比較的高い相関関係にあり、これらの比例式は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} T_{1/3} &= 1/(1.138f_p) = 0.879 T_p \\ T_{1/10} &= 1/(1.144f_p) = 0.871 T_p \\ \bar{T} &= 1/(1.264f_p) = 0.791 T_p \\ T_{max} &= 1/(1.133f_p) = 0.883 T_p \end{aligned}$$

これより、浅海域にある観測塔においても、 $T_{1/3}$ と T_p の間にも直線関係が成立し、かつ $T_{1/3}$ 以外の $T_{1/10}$ 、 \bar{T} 、 T_{max} についても同様の関係がみられる。しかし、 $T_{1/3}$ に対する T_p の比例係数についてみると、他の海域より小さい値を示し、むしろ線型シミュレーションの結果とほぼ一致している。これは、観測塔における波形分布のひずみ度 C_s および尖鋭度 C_k が、それぞれ正規分

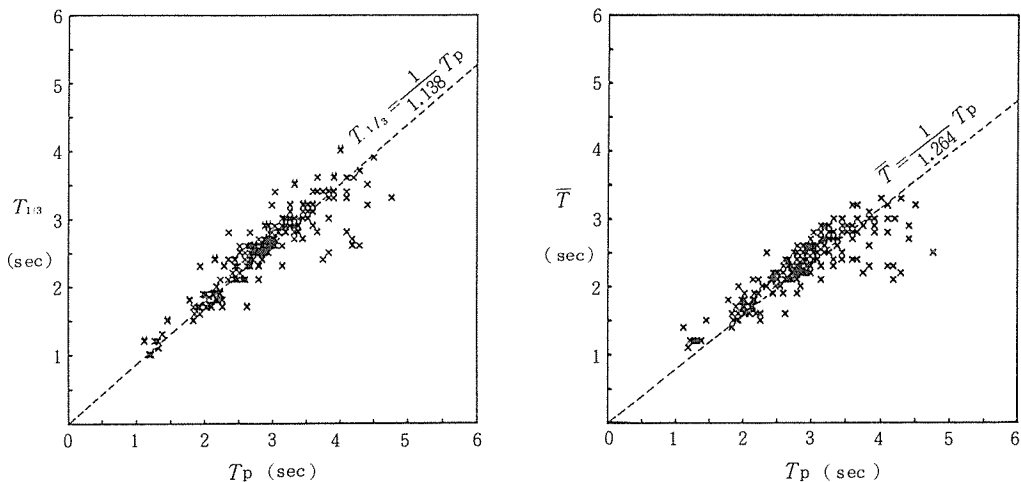
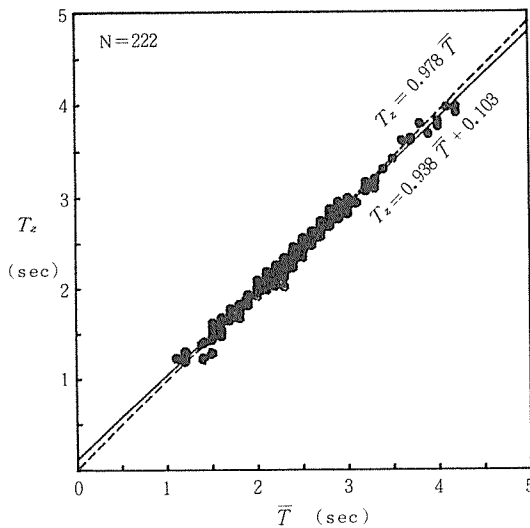


図-9 代表波周期と卓越周期の関係

図-10 平均周期 \bar{T} と T_z の関係

をゼロアップクロス周期の平均値としたものである。このようなスペクトル計算によって求めた平均周期 T_z と、実測の平均周期 \bar{T} の値を観測塔における波形記録から計算し、その関係を前述の222例について示したのが図-10である。これらの関係は、次のような回帰式あるいは比例式によって表わすことができる。

$$T_z = 0.938 \bar{T} + 0.103 \quad (\gamma = 0.993)$$

$$T_z = 0.978 \bar{T}$$

合田ら⁵⁾は171例について検討した結果、 T_z/\bar{T} は0.6~1.0の間に分布し、その平均値は0.83という結果を得ている。これに比べて、観測塔では T_z と \bar{T} の比は1.0に非常に近い値となる。

8. 摘 要

有明海に設置されている海象観測装置によって得られた波浪データを統計的に解析し、浅海域における波の周期分布ならびに変動特性について検討を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 浅海域においては周期が1~3秒の波が卓越している。
- 2) 代表波周期は有義波高の増加につれてほぼ直線的に増加する。
- 3) 代表波周期相互の平均周期比(4か月間)は、

$$T_{1/3}/\bar{T} = 1.242, \quad T_{1/10}/\bar{T} = 1.272$$

$$T_{max}/\bar{T} = 1.262, \quad T_{1/10}/T_{1/3} = 1.022$$

$$T_{max}/T_{1/3} = 1.013, \quad T_{max}/T_{1/10} = 0.991$$

である。

- 4) パワースペクトルがピークを示す周期 T_p と代表波周期の比例式は次のように表わされる(222例)。

布での値0.0, 3.0にかなり近い値を示す¹⁾ことからある程度理解できるが、合田ら⁵⁾は、さらにこのような比例係数の差がスペクトルにおける低周波側の減衰の程度に関係する、としている。

次に、不規則波の統計理論によると、ゼロアップクロス法で定義した波の平均周期 T_z は、周波数スペクトルの0次および2次モーメントを使って次式で表わされる⁵⁾。

$$T_z = (m_0/m_2)^{1/2}$$

$$\text{ここで, } m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df$$

この式は、単位時間内に波形 η が上昇しながらゼロ線を横切る回数を η と η' の結合確率密度関数より求め、これの逆数

$$T_{1/3} = 0.879 T_p, \quad T_{1/10} = 0.871 T_p \\ \bar{T} = 0.791 T_p, \quad T_{max} = 0.883 T_p$$

5) パワースペクトルの積率から求めた平均周期 T_z と波形から求めた平均周期 \bar{T} の比例式は次式のようになる (222例).

$$T_z = 0.978 \bar{T}$$

参 考 文 献

- 1) 藤本昌宣・渡辺 潔 (1984). 海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析 I. 表面波形特性について, 佐大農彙, 57, 103—114
- 2) 合田良實 (1982). 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 東京, p. 178—184
- 3) 藤本昌宣・渡辺 潔 (1985). 海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析 II. 波高特性について, 佐大農彙, 58, 59—71
- 4) 合田良實 (1975). 波浪の統計的性質とその応用, 第13回水工学に関する夏期研修会講義集, B—1, 1—21
- 5) 合田良實・永井康平 (1974). 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技術研究所報告, 13, 1—37
- 6) 光易 恒 (1970). 風波のスペクトルの発達(2), 第17回海岸工学講演会講演集, 1—7